

(49) 一地点の地震観測記録を含む時空間確率過程のシミュレーション

埼玉大学大学院 小野 牧夫
埼玉大学工学部 川上 英二

1. 目的

トンネル、パイプライン、地中埋設管路等の地震波動の伝播に伴う動的応答解析、耐震設計を行う場合、まず、管路・地盤・基盤を力学的にモデル化し、地盤または基盤における地震動を入力する必要がある。地盤または基盤からの地震入力、管路に沿った各点で与える必要があり、この各点での変位の時刻歴を、つまり、時間及び空間の関数としての地震波形をどのように想定するかは、管路の応答に支配的な影響を及ぼすため重要な問題である。

従来、時間に関する入力地震動としては、エル・セントロ地震、タフト地震、十勝沖地震、新潟地震等の過去のある一地点で実測された強震観測記録に基づく波形が用いられる事が多い。また、得られた波形を場所に関して伝播させる際には、

(1) 全く同一の波形が、ある一定のみかけ速度で水平方向に伝播する場合

(2) 入力地震動の場所による違いが管路の挙動に及ぼす影響は、表面層の不均質性の影響に比べ少ないと考え、場所によらず同一形状、同一位相の波形を基盤から入射させる場合

を想定する事が多い。

しかし、(1)の考えに基づいた場合、地震波の水平方向のみかけ伝播速度として、地盤のせん断波速度を用いる(石油パイプライン基準)か、アレー観測記録の相互相関関数のピークから求められた値を用いるかでは値が十倍程度も異なり、どちらの値を使用するかで、構造物の応答が著しく異なる可能性がある。また、合理的であるという点では、みかけ速度としては後者の値を用いるのが妥当であるが、波形の変形の影響を無視しているため、危険側の評価を与える可能性があるという問題がある。

また、(2)の考えは主に地盤構造が場所により大きく異なる地盤に対して用いられている。しかし、例えば、地質調査によっては、地表層が水平方向に一樣な場合も多く、こうした場合には、地表面ではひずみが生じないというように危険側に評価をしてしまう問題を含んでいる。

さらに、(1)(2)では波形の変形が無視されているが、近年、アレー観測結果を用いて、地震波動の場所による変形に関する研究が行われ、この波形変形が地盤のひずみに与える影響が無視できないことが指摘されている¹⁾。

建築物の耐震設計を行う場合を考えてみても、入力地震動としては、人工的にシミュレートされた波形を用いる場合もあるが、エル・セントロ地震、タフト地震、十勝沖地震等の実測された地震動波形を用いて耐震性のチェックが行われる事が多い。これは、実際に観測された波形は現実的であるという理由で尊重されている結果であると考えられる。地中埋設管に対しても、建築物に対してと同様に、代表的なかつ、現実的な地震波形を作るための研究が必要であると考えられる。

以上のような観点から、著者らは、二重フーリエ級数を用いた、現実的で、波形の変形を考慮した、地中埋設構造物に対する時空間関数としての入力波をシミュレートするための手法を展開した²⁾。そして、その一つの適用例として、Imperial Valley地震の観測記録を含む時空間関数としての地震波形を求めていく³⁾。本論文では、より簡便な方法として、二重フーリエ級数の代わりに、従来の多変数の確率過程の理論を拡張する方法を展開し、その適用例を示すことを目的としている。

2. 方法

地盤の変位を互いに相関を有する複数 (n 個) の確率過程 $U_i(t)$ 、(場所 i , 時間 t) で表す。この時空間確率過程 $U_i(t)$ は、次の 2 つの条件を満足するものと仮定する。

条件(A)：時空間確率過程と観測波形との時間に関する自己相関関数（またはパワースペクトル）は一致する。観測波形の自己相関関数と、従来の研究に基づく、地震波のみかけの伝播速度、波形の変形の程度（コヒーレンシー）とから、相互相関関数（またはクロススペクトル）を想定する。時空間確率過程の相互相関関数は、想定した相互相関関数に一致する。

条件(B)：時空間確率過程は、一地点の観測地点においては観測波形に厳密に一致する。

本研究では、条件(A)で与える相互相関関数を、波が正方向にある一定の速度で伝播し、また、二地点間距離が離れる程、相関が減少するような関数とした。また、条件(B)に関しては、観測波形に一番目の波形 $U_1(t)$ を一致させた。

確率過程 $U_i(t)$ としては、従来の研究結果⁴⁾⁵⁾に基づき次式を用いた。

$$U_i(t) = \sum_{p=1}^i \sum_{n=1}^N |H_{ip}(\omega_n) \sqrt{\Delta\omega}| \sqrt{2} \cdot \cos\{\omega_n t + \theta_{ip}(n) + \phi_{pn}\} \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

ただし、直流成分は存在しないものと想定している。また、 $\omega_n = 2n\pi/T$ (T は記録の観測時間) である。 $H_{ip}(\omega_n) \sqrt{\Delta\omega}$ は、条件(A)で与えるクロススペクトルを成分とするマトリックスを分解して与えられる。また、 $\theta_{ip}(n)$ は、 $H_{ip}(\omega_n) \sqrt{\Delta\omega}$ の位相角である。

従来、多変数の確率過程のシミュレーションにおいては、 ϕ_{pn} ($p=1, \dots, m, n=1, \dots, N$)の全部を $0 \sim 2\pi$ の範囲で互いに独立な様な乱数としているが、本手法では、この内の ϕ_{pn} ($p=2, \dots, m, n=1, \dots, N$) は、独立、様な乱数とし、 ϕ_{1n} ($n=1, \dots, N$)は、観測波形と一致するという条件(B)より決定する。まず、観測波形 $F(t)$ を、

$$F(t) = \sum_{n=1}^N \{a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)\}$$

とフーリエ級数に展開し、一番目の波形 $U_1(t)$ と比較して、次式のように決定する。

$$\phi_{1n} = \tan^{-1} \left(\frac{-b_n}{a_n} \right) \quad (n=1, \dots, N)$$

提案した一地点の観測記録を含む地震波形の時空間確率過程のシミュレーションの方法は、以下の手順にまとめられる。

- ① 観測波形を、フーリエ級数に展開し、フーリエ係数 a_n, b_n を求める。
- ② 確率過程の番号 i と場所 x_i との関係を設定する。
- ③ みかけの伝播速度、変形定数を想定し、クロススペクトルを求める。
- ④ クロススペクトルマトリックスを分解して、 $|H_{ip}(\omega_n) \sqrt{\Delta\omega}|, \theta_{ip}(n)$ を求める。
- ⑤ ϕ_{1n} ($n=1, \dots, N$) を求める。
- ⑥ ϕ_{pn} ($p=2, \dots, m, n=1, \dots, N$) を、独立、様な乱数として発生させる。
- ⑦ 時空間確率過程を計算する。

3. 数値計算結果

観測波形としては、Imperial Valley 地震 (1940年 5月 18日, マグニチュード 7.1) の El Centro の地点で観測された図-1 に示す南北方向の変位記録 (最大値 = 10.9 cm) を使用した⁶⁾。そして、観測波形の記録長 T を 48sec として 1 波から 29 波までのフーリエ級数に展開した。

波形をシミュレートする地点 (場所) は、地点間の距離が 400m で、正負両方向に ±6km まで 31 個の地点である。波形 $U_i(t)$ のうち、 $i=1$ の波形を原点 $x=0$ での観測波形とし、 $i=2, 4, 6, \dots$ を正の地点での波形、 $i=3, 5, 7, \dots$ を負の地点での波形とし、 i が大きくなる程原点から正負交互に遠ざかる地点での波形とした。与えられた観測波形 (図-1) と相互相関関数 (波動のみかけの伝播速度 = 1000 m/sec, 変形定数 = $0.2 \times 2\pi$, 図-2) に対して、上に示した手順により時空間過程をシミュレートすることが可能であり、シミュレートされた時空間地震波形を図-3 に示す。図-3 の太線で示すように、時空間波形は、一地点

($x=0$)において、観測波形(図-1)と一致しており条件(B)を満足していることが確認できる。図-3の時空間波形から、相互相関関数を時間差 $-24\text{sec} \leq \tau \leq +24\text{sec}$ 、二地点間距離 $-6\text{km} \leq x_0 \leq +6\text{km}$ の範囲で計算した結果を図-4に示す。

また、図-5には、図-3と同一の条件であるが、確率変数 ϕ_{pn} ($p=2, \dots, m, n=1, \dots, N$)の値のみ、図-3とは異なる乱数を用いた場合の結果を示す。図-5の時空間波形の相互相関関数を図-6に示す。

図-4, 6の相互相関関数は、図-2で想定した相互相関関数に近似的ではあるが、一致していないことが確かめられる。しかし、図-3, 5に示したような時空間波形のサンプルを多数回(ここでは100回)シミュレートし、相互相関関数のアンサンブル平均を求めると(図-7), 図-2で想定した相互相関関数によく一致した。

4. 結論

本研究の目的は、観測された一地点での強震記録を正確に満足する、時間と場所との連続的な時空間関数としての地盤変位を合理的にシミュレートする事である。前手法²⁾³⁾では、二重フーリエ級数を用いた方法を展開したのに対し、本手法では、従来の多変数の確率過程の理論を拡張する方法を展開した。

一つの適用例として、Imperial Valley地震を観測波形として与え、波が正方向に伝播し、また、二地点間距離が離れる程、相関が減少するような相互相関関数を想定し、時空間関数としての波形をシミュレートした。そして、得られた時空間波形が、一地点においては観測波形を満足している事を示した。

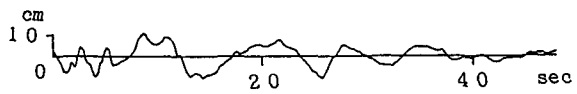


図-1 Imperial Valley地震(1940)の観測波形

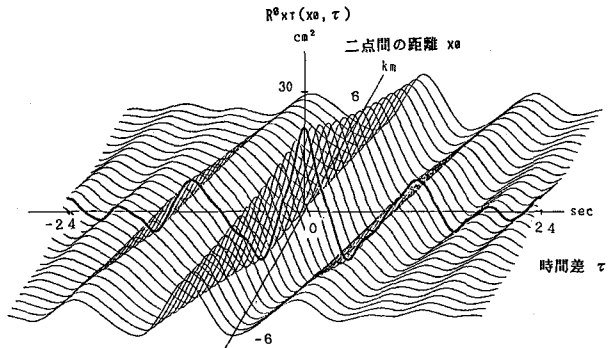


図-2 想定した相互相関関数 $R^0_{x\tau}(x_0, \tau)$

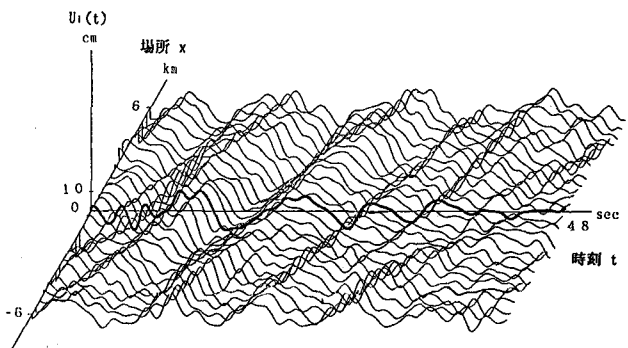


図-3 シミュレートされた時空間地震波形 $U_i(t)$

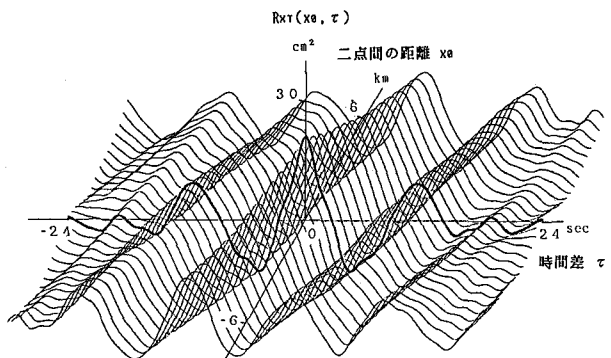


図-4 波形サンプル(図-3)の相互相関関数 $R_{x\tau}(x_0, \tau)$

また、時空間波形の一つのサンプルから得られる自己または相互相関関数が、想定した自己または相互相関関数に近似的であることを示した。さらに、自己または相互相関関数のアンサンブル平均は、想定した自己または相互相関関数に一致することを示した。これらの結果は、多変数の確率過程のシミュレーションの従来の方法そのものの性質であり、前手法²⁾³⁾で得られた結果と大きく異なる点である。

本手法では、前手法²⁾³⁾に比較して、条件(A)が上述の意味において幾分ゆるめられているが、収束計算が不要であり、解が存在しない可能性を心配する必要もないという長所を有している。このため、提案した本方法は、一地点の観測記録を含む時空間地震波形をシミュレートするための、一つの簡便な方法になりうるものであると考えられる。

参考文献

- 1) 川上英二・佐藤靖彦：土木学会論文報告集，No.337，pp.37-46，1983.
- 2) 川上英二：土木学会論文集，No.410/I-12，pp.435-443，1989.
- 3) 川上英二：第8回日本地震工学シンポジウム，pp.1311-1316，1990.
- 4) Shinozuka, M, and Jan, C.-M.: Journal of Sound and Vibration, Vol.25, No.1, pp.111-128, 1972.
- 5) 星谷勝：土木学会論文報告集，No.270, pp.131-134, 1978.
- 6) Hudson, D. et al.: EERL 71-50, California Institute of Technology, 1971.

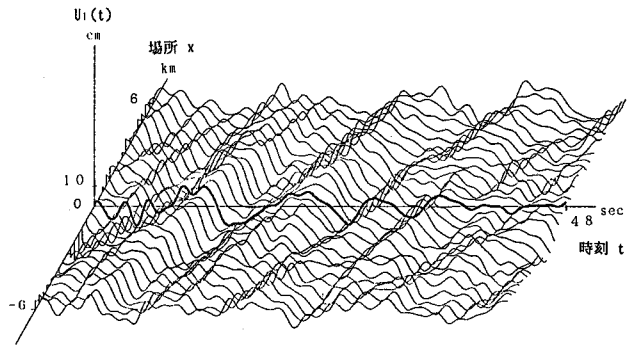


図-5 乱数を変えてシミュレートされた時空間地震波形 $U_i(t)$

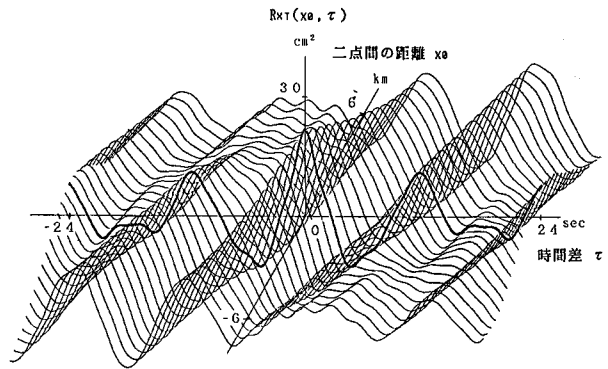


図-6 波形サンプル(図-5)の相互相関関数 $R_{KT}(x_0, \tau)$

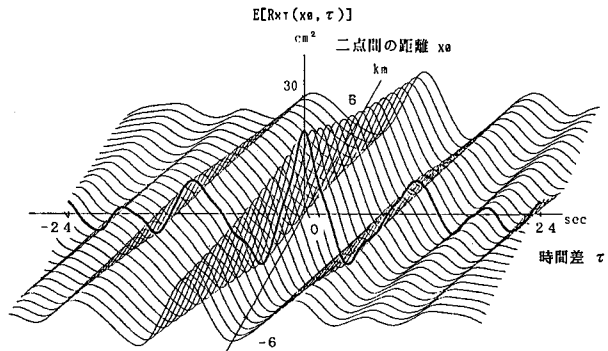


図-7 相互相関関数のアンサンブル平均 $E[R_{KT}(x_0, \tau)]$

(連絡先：〒338 浦和市下大久保 255, 埼玉大学工学部建設工学科)